Ferdowsi Civil Engineering, 37, 4, 2024. (87-106)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building

Research Article

Mohammad Amooshahi[1], Asghar Milan[2], Saeid Sadeghian[3], Alireza Gharagozlou[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.88986.1315

1- Introduction

In recent years, Building Information Modeling (BIM) has seen rapid adoption in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industries, driving demand for precise as-built models. The conventional methods for capturing 3D spatial data, such as terrestrial laser scanners and photogrammetry, are effective but come with challenges like high costs and the need for specialized equipment and operators. The advent of LiDAR technology integrated into smartphones, particularly since the release of the iPhone 12 Pro in 2020, has sparked interest in exploring the potential of these devices for surveying applications.

This study examines the effectiveness of the iPhone 12 Pro's LiDAR sensor in capturing 3D spatial data of indoor environments, specifically comparing its accuracy in two scanning conditions: with and without the use of a gimbal stabilizer. The results were benchmarked against more established methods, including photogrammetry and total station measurements, which serve as high-precision baselines for comparison. This research addresses a critical question: Can smartphone-based LiDAR sensors provide reliable data for indoor mapping with sufficient accuracy to replace or complement traditional methods?

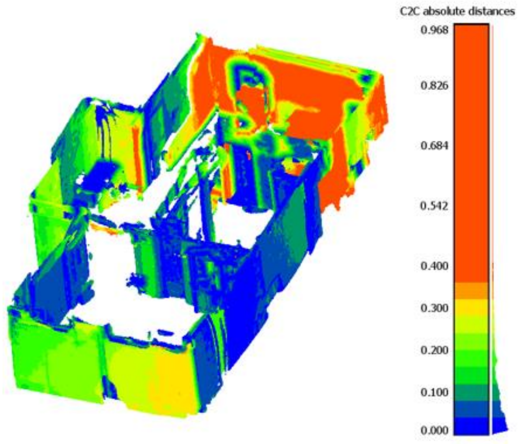
2-Methodology

To evaluate the performance of the iPhone's LiDAR sensor, the study utilized a systematic data collection process in a controlled indoor environment. Initially, control points were established using a total station to ensure a reliable reference framework for accuracy assessment. The room was scanned using the iPhone in both gimbal-assisted and unassisted modes. Photogrammetric data was collected using a series of high-resolution images processed with structure-from-motion techniques to create detailed point clouds. The data from each method were aligned using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm to minimize alignment errors.

The accuracy of the smartphone LiDAR scans was assessed using cloud-to-cloud (C2C) distance analysis and Root Mean Square Error (RMSE) calculations. This included evaluating the geometric consistency and spatial accuracy of the generated 3D models by comparing them against the total station and photogrammetric point clouds.

3-Findings

The results indicate that using a gimbal significantly improves the accuracy of the iPhone LiDAR scans. In the C2C analysis, scans without a gimbal exhibited errors exceeding 35 cm, while with a gimbal, these errors were reduced to below 10 cm in most cases. However, some residual errors between 10-20 cm persisted in certain areas.



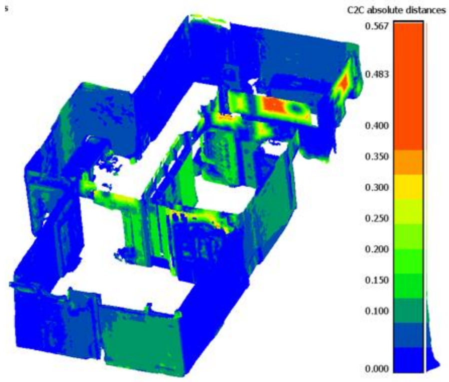
(a)

*Manuscript received July 20, 2024, Revised September 22, 2024, Accepted December 18, 2024.

[1] M.Sc. Student of Land Administration Systems, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

[2] Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. **Email:** a_milan@sbu.ac.ir

[3,4] Associate Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.



(b)

Figure 1, Scanning four rooms with iPhone, without gimbal(a), and with gimbal(b)

The RMSE for smartphone-derived data was between 15-20 cm, compared to 1.5 cm for photogrammetry and 2 mm for total station measurements. This suggests that while smartphone-based LiDAR can be useful for medium-accuracy indoor mapping, it is not suitable for high-precision engineering tasks.

Table 1, Control points and checkpoints error

method	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE (m)
Photogrammetry	0.008	0.011	0.014
iPhone + Gimbal 1	0.113	0.168	0.203
iPhone + Gimbal 2	0.084	0.148	0.171
iPhone + Gimbal 3	0.050	0.145	0.153

The study also found that the iPhone's LiDAR sensor, when stabilized with a gimbal, provided much cleaner point clouds with reduced noise and overlapping scan errors (figure 2,3). Without stabilization, the scans were prone to inaccuracies caused by hand movements, which led to significant deviations in the resulting 3D point clouds.



(a) **(b)**

Figure 2, Vertical view of the point cloud obtained from the iPhone scanner with (a) and without gimbal (b)

The use of a gimbal in smartphone-based LiDAR scanning improves data accuracy and noise reduction, enabling effective vectorization of captured point clouds. This enhances data quality, enabling the creation of BIM directly from smartphone-derived scans, making smartphone LiDAR a cost-effective tool for medium-accuracy indoor mapping projects.



Figure 3, Preparing a valid and realistic building information model using a 2D map and 3D point cloud information

4-Discussion

The research highlights both the potential and limitations of smartphone-based LiDAR technology. Although the iPhone's sensor is not yet capable of matching the precision of traditional surveying tools, it offers a cost-effective and accessible alternative for less demanding applications. The improvements observed with the use of a gimbal point to a practical solution for increasing the accuracy of smartphone scans. This could be particularly beneficial in scenarios where quick and on-the-go data acquisition is required, such as initial site inspections, interior renovations, or real estate assessments.

Despite its advantages in terms of portability and affordability, smartphone LiDAR sensors face challenges in larger or more complex indoor spaces where high precision is critical. The current limitations include a maximum effective range of approximately 5 meters, sensitivity to environmental lighting conditions, and noise accumulation over longer distances.

5-Conclusion

The findings of this study confirm that while smartphone LiDAR sensors have potential applications in indoor surveying, they currently fall short of the precision required for detailed engineering projects. However, their ease of use, accessibility, and relatively low cost make them a promising tool for less demanding spatial data collection tasks. With further advancements in sensor technology and stabilization techniques, the accuracy and reliability of these devices could improve, paving the way for broader adoption in the AEC industry.

Future research could explore integrating smartphone-based LiDAR data with other sources, such as drone-based photogrammetry or traditional ground-based surveys, to enhance the overall accuracy of 3D models. Additionally, investigating the use of advanced algorithms to correct the inherent limitations of smartphone sensors could further expand their usability in professional contexts.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

بررسی قابلیت سنسور مدت پرواز گوشی‌های هوشمند در داده‌برداری فضای داخلی ساختمان*

مقاله پژوهشی

محمد عموشاهی[۱] اصغر میلان[۲] سعید صادقیان[۳] علیرضا قراگوزلو[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.88986.1315

چکیده با توجه به افزایش چشمگیر در استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و نقش برجسته آن در صنایع معماری، مهندسی و ساخت و ساز (AEC)، دستیابی به یک مدل وضعیت موجود دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در عین حال، ابزارهای کنونی برای تهیه داده‌های سه‌بعدی و بازسازی وضعیت موجود ساختمان‌ها با چالش‌هایی نظیر محدودیت در دقت و هزینه‌های بالا مواجه هستند. از زمان معرفی سنسور لیدار در گوشی‌های آیفون در سال ۲۰۲۰، تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی قابلیت این سنسور در حوزه‌های مختلف به‌ویژه نقشه‌برداری صورت گرفته است. این پژوهش به مقایسه داده‌های اسکن سه‌بعدی آیفون در دو حالت با و بدون استفاده از گیمبال با داده‌های حاصل از فتوگرامتری و توتال استیشن می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گیمبال باعث رفع خطای اسکن چندگانه و افزایش دقت هندسی می‌شود. در تحلیل ابر به ابر (C2C) بدون گیمبال، خطاهای بیش از ۳۵ سانتی‌متر مشاهده شد، در حالی که با استفاده از گیمبال، این خطاها به حداقل رسیده و اکثر اختلافات زیر ۰٫۱۰ سانتی‌متر بودند. باوجود در برخی از قسمت‌ها خطا ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر باقی ماند. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای داده‌های برداری تلفن هوشمند بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بوده است. در مقایسه، RMSE توتال استیشن و فتوگرامتری به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۱٫۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است؛ بنابراین داده‌های تلفن‌های هوشمند برای نقشه‌برداری داخلی با دقت متوسط مناسب هستند، اما برای پروژه‌های مهندسی دقیق قابل اعتماد نیستند.

واژه‌های کلیدی گوشی هوشمند، اسکنر سه‌بعدی، فتوگرامتری، مدل اطلاعات ساختمان، کاداستر سه‌بعدی.

Investigating the Capability of the Smartphones Time-Of-Flight Sensor to Data-Capturing Interior Spaces of Building

Mohammad Amooshahi Asghar Milan Saeid Sadeghian Alireza Gharagozlou

Abstract *Considering the significant increase in the use of Building Information Modeling (BIM) and its prominent role in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industries, achieving an accurate as-built model is critical. However, current tools for acquiring 3D data and reconstructing as-built building conditions face challenges such as limitations in accuracy and high costs. Since introducing the LiDAR sensor in iPhones in 2020, extensive research has been conducted to evaluate the capabilities of this sensor across various fields, especially in surveying. This study compares 3D scan data from the iPhone in two modes— with and without using a gimbal with data obtained from photogrammetry and a total station. The results show that using a gimbal eliminates the errors from multiple scans and enhances geometric accuracy. In the cloud-to-cloud (C2C) analysis without a gimbal, errors exceeding 35 cm were observed, while with the gimbal, these errors were minimised, with most discrepancies being below 0.10 cm. Although some errors ranged from 10 to 20 cm, the root mean square error (RMSE) for smartphone-derived vector data ranged between 15 to 20 cm. In comparison, the RMSE for the total station and photogrammetry was measured at 2 mm and 1.5 cm, respectively. While the accuracy of this data is lower, it is suitable for medium-accuracy indoor building surveys, though it is less reliable for engineering projects requiring very high precision.*

Key words Smartphone, 3D scanner, photogrammetry, building information model, 3D cadastre.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۹/۳ می‌باشد..

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۲)نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Email: a_milan@sbu.ac.ir

(۳) دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۴) دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

مقدمه

در دهه اخیر، داده‌های مکانی سه‌بعدی با کیفیت بالا به‌عنوان ابزاری کلیدی برای توسعه و مدیریت زیرساخت‌های شهری، برنامه‌ریزی زمین، و سیستم‌های کاداستر سه‌بعدی به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این داده‌ها به دلیل قابلیت ارائه مدل‌های دقیق از محیط‌های شهری، بهینه‌سازی فرایندهای تصمیم‌گیری، و ارتقای کارایی پروژه‌های زیرساختی، نقش حیاتی در حوزه‌های مختلف ایفا می‌کنند. تهیه این داده‌ها از طریق طیف گسترده‌ای از ابزارها و تکنیک‌ها امکان‌پذیر است که بسته به نوع پروژه، سطح دقت مورد نیاز و بودجه قابل دسترس، انتخاب می‌شوند. روش‌های سنتی مانند اندازه‌گیری با متر نواری یا متر لیزری برای پروژه‌های کوچک و نیازمند به‌دقت پایین مناسب هستند، اما با افزایش پیچیدگی و مقیاس پروژه‌ها، تکنیک‌های پیشرفته‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزارهایی همچون توتال استیشن‌ها، اسکنرهای لیزری زمینی و فوتوگرامتری از روش‌های پیشرفته‌ای هستند که امکان تهیه داده‌های سه‌بعدی با دقت بالا را فراهم می‌کنند. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند؛ به عنوان مثال، اسکنرهای لیزری توانایی جمع‌آوری حجم زیادی از داده‌ها را در زمان کوتاه دارند، اما هزینه بالای آنها و پیچیدگی در پردازش داده‌ها ممکن است استفاده از آنها را در برخی پروژه‌ها محدود کند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در تلفن‌های هوشمند و تجهیز آنها به سنسورهای Time-of-Flight (ToF)، امکان اسکن سه‌بعدی دقیق را فراهم آورده است. این فناوری نوین قابلیت استفاده گسترده در زمینه‌های مختلف، از جمله مستندسازی ساختمان‌ها، مدیریت دارایی‌های شهری، و حتی کاداستر را دارد. با توجه به هزینه پایین‌تر، قابلیت حمل و دسترسی عمومی این دستگاه‌ها، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک، تلفن‌های هوشمند به عنوان جایگزینی برای ابزارهای سنتی در بسیاری از کاربردهای سه‌بعدی مورد استفاده قرار گیرند. جدول (۱) مقایسه‌ای از مزایا و معایب استفاده از سنسورهای اسکن سه‌بعدی تلفن‌های هوشمند در مقابل تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای مانند اسکنرهای لیزری و سیستم‌های فوتوگرامتری ارائه می‌دهد. این مقایسه شامل معیارهایی همچون دقت اندازه‌گیری، هزینه، قابلیت حمل، و زمان مورد نیاز برای جمع‌آوری داده‌ها است که می‌تواند در انتخاب روش مناسب برای پروژه‌های مختلف راهگشا باشد. این روند نشان می‌دهد که استفاده از تکنولوژی‌های مبتنی بر تلفن هوشمند در حال تبدیل‌شدن به رویکردی اقتصادی و کارآمد برای دستیابی به داده‌های سه‌بعدی است و می‌تواند آینده جمع‌آوری داده‌ها در حوزه‌های مختلف از جمله نقشه‌برداری و مدیریت شهری را دگرگون کند.

جدول ۱ مقایسه سه روش تهیه داده‌های سه‌بعدی

ابزار	مزایا	معایب
سنسور اسکن سه‌بعدی گوشی هوشمند	اخذ و پردازش داده‌ها با سرعت بالا قیمت مناسب نمایش بلادرنگ حین برداشت مقیاس ۱:۱	محدودیت در دقت وجود نویز و اعوجاجات فراوان برد محدود پنج‌متر افزایش خطا در محیط‌های بزرگ‌تر
اسکنر لیزری زمینی	دقت مناسب حفظ دقت در فواصل طولانی‌تر	قیمت بالا دشواری در جابه‌جایی ایستگاه‌ها
فتوگرامتری	دقت مناسب قیمت پایین	نیاز به نقاط کنترل زمان بالای اخذ داده و پردازش نیاز به اپراتور متخصص نور محیط و حرکت اجسام می‌تواند مشکل‌ساز باشد

تلفن‌های هوشمند به دلیل در دسترس بودن برای عموم مردم و قابلیت استفاده گسترده توسط شهروندان، می‌توانند به‌عنوان بستری مناسب برای جمع‌آوری داده‌های سه‌بعدی مردم گستر عمل کنند. این رویکرد، نه‌تنها به جمع‌آوری داده‌های مکانی دقیق و به روز کمک می‌کند، بلکه امکان مشارکت فعال شهروندان در پروژه‌های مرتبط با مدیریت شهری، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها، و پایش تغییرات محیطی را نیز فراهم می‌سازد. تلفن‌های همراه در ابتدا صرفا به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباطات صوتی و ارسال پیامک طراحی شده بودند، اما باگذشت زمان و پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری، امکانات جدیدی به آنها افزوده شد. از جمله این امکانات اولیه می‌توان به بازی‌های ساده، ماشین حساب، و چراغ قوه اشاره کرد. با این حال، تحولات تکنولوژیکی در دهه‌های اخیر، تلفن‌های همراه را به دستگاه‌هایی بسیار فراتر از ابزارهای ارتباطی تبدیل کرده است. امروزه، گوشی‌های هوشمند به یکی از ابزارهای کلیدی زندگی روزمره بدل شده‌اند و بسیاری از نیازهای کاربران را به طور یکپارچه برطرف می‌کنند. به عنوان مثال، کاربران می‌توانند از تلفن‌های هوشمند برای انجام امور بانکی، پرداخت قبوض، درخواست تاکسی، سفارش غذا، مسیریابی، تعیین موقعیت جغرافیایی دقیق، و حتی تهیه عکس‌های حرفه‌ای استفاده کنند. این قابلیت‌ها نشان دهنده تحولی بزرگ در نقش تلفن‌های هوشمند از یک ابزار ارتباطی به یک دستگاه چند منظوره است که تقریبا تمامی جنبه‌های زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است.

با پیشرفت‌های اخیر در فناوری و تجهیز تلفن‌های هوشمند به سنسورهایی نظیر ToF و دوربین‌های پیشرفته، این دستگاه‌ها اکنون قادرند داده‌های سه‌بعدی با کیفیت بالا و دقیق از محیط اطراف خود تولید کنند. این قابلیت، پتانسیل زیادی برای کاربردهای گسترده‌تر در آینده دارد. به این ترتیب، تلفن‌های هوشمند می‌توانند در آینده به ابزارهای اصلی تولید داده‌های مکانی با دقت بالا تبدیل شوند و روش‌های سنتی نقشه‌برداری و مستندسازی محیط‌های شهری را به طور مؤثری جایگزین کنند. از سوی دیگر، با توجه به افزایش تقاضا برای اطلاعات به‌روز و آنی در مورد زمین و املاک، برنامه‌های نقشه‌برداری متنوعی در گوشی‌های هوشمند توسعه یافته‌اند. به نظر می‌رسد با ادامه روند پیشرفت تکنولوژی، روش‌های سنتی نقشه‌برداری کاداستر و جنبه‌های قانونی آن در آینده‌ای نه چندان دور دگرگون خواهند شد [1]. استفاده از گوشی هوشمند برای نقشه‌برداری، کارها را آسان‌تر و کارآمدتر کرده است [2]؛ بنابراین با گسترش مفهوم «نقشه‌برداری دیجیتال [3]»، اکنون می‌توان کار میدانی به کمک تلفن هوشمند را به عنوان جایگزینی برای رویکردهای کلاسیک جمع‌آوری داده ارزیابی نمود [4].

تلفن‌های هوشمند به دلیل وجود حسگرهای مختلف از جمله دستگاه سنجش لختی (IMU)، حسگرهای مجاورت، بارومتر و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، قابلیت‌های بالایی در تعیین موقعیت از خود نشان داده‌اند. با این وجود محدودیت‌های آنها باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و مستندسازی شود همچنین باید دقت نمود تا با انتخاب مناسب الگوریتم کاری برای استفاده از قابلیت گوشی‌های هوشمند در کاربردهای نقشه‌برداری دقت‌های مورد نیاز حاصل گردد [1]. پیشرفت حسگرها، افزایش توان محاسباتی و حافظه داخلی در گوشی‌های هوشمند و تبلت‌ها، آنها را به پلتفرم‌های رقومی اساسی برای کارهای مختلف میدانی تبدیل کرده است [4]. با ورود سنسورهای لیدار در سال ۲۰۲۰، قابلیت گوشی‌های هوشمند برای اندازه‌گیری‌های میدانی علوم زمین، نقشه‌برداری، مدل‌سازی اطلاعات ساخت و دیگر کاربردها، دچار تغییر و تحول اساسی گردید.

با ورود سیستم لیدار استفاده از گوشی‌های هوشمند در کاربردهای نقشه‌برداری و عمرانی توسعه یافت [4]. ادغام ویژگی‌های اسکن در دستگاه‌های تلفن همراه، دنیای جدیدی از امکانات را برای نقشه‌برداری سه‌بعدی فراهم کرد. در این سیستم‌ها جمع‌آوری داده‌ها بسیار سریع‌تر از دستگاه اسکن لیزری زمینی (TLS) انجام می‌شود که این امر علاوه بر صرفه‌جویی در زمان ثبت داده‌ها، امکان نمایش بلادرنگ ابر نقطه یا مش به دست آمده در حین جمع‌آورری داده را برای کاربر فراهم نموده است [5-6]. در چند دهه اخیر، فناوری اسکن کاهش قابل توجهی در قیمت و تنوع دستگاه‌ها داشته است. از اسکنرهای لیزری گران قیمت که روی سه‌پایه‌ها نصب می‌شوند، تا سیستم‌های کوله‌پشتی، دستگاه‌های دستی سیار و در نهایت ادغام در تلفن‌های هوشمند. با این وجود هنوز کیفیت

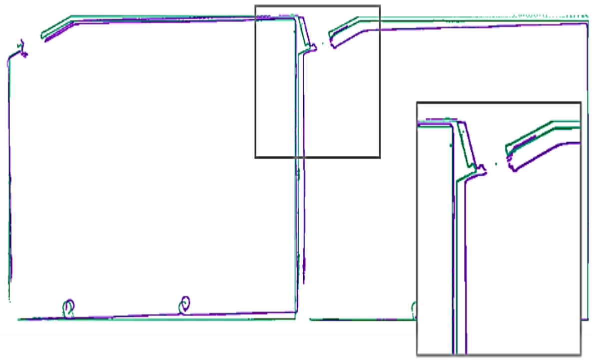
داده‌ها به وضوح کمتر از داده‌های اخذ شده توسط حسگرهای تخصصی لیدار می‌باشد [7].

مکانیزم اندازه‌گیری فاصله در سیستم‌های لیدار می‌تواند متفاوت باشد. حالت اول که سیستم‌های مدت پرواز (ToF) نام دارد فاصله را با ثبت زمان انتقال نور بین حسگر لیزری و اشیا اندازه‌گیری می‌کند، و مورد دوم از اختلاف فاز بین سیگنال‌های منتشر شده و سیگنال‌های بازگشتی برای تعیین فاصله اندازه‌گیری بهره می‌گیرد. البته این مورد را باید در نظر داشت که سیستم‌های مدت پرواز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند؛ اما دقت کمتری نسبت به سیستم اختلاف فاز دارند [8]. اگر چه نوع سنسور iPhone تا کنون به عنوان یک راز تجاری باقی مانده است، اما برخی مطالعات آن را به عنوان یک لیدار مدت پرواز تعریف می‌کنند [7-9]. دستگاه‌های ToF سنسورهای فعالی هستند که می‌توانند در فواصل محدود، عمق و تصویر دو بعدی را با نرخ فریم بالا ارائه کنند. این قرائت‌ها ممکن است نویز و خطاهای زیادی داشته باشند. همچنین در مقایسه با اسکنرهای لیزری، دوربین‌های ToF تصویری با عمق دوبعدی با وضوح پایین‌تر با نرخ فریم بالاتر و با هزینه‌های رقابتی بسیار پایین‌تر ارائه می‌دهند [10]. دوربین‌های ToF با موفقیت در کاربردهای مختلفی همچون نقشه‌برداری و مکان‌یابی هم‌زمان (SLAM) [11-12]، بازسازی سه‌بعدی صحنه‌های ثابت [13-14] استفاده می‌شوند. البته برای استفاده از این دوربین‌ها در بعضی موارد نیاز به اصلاح سیگنال و کاهش نویز آنها وجود دارد. با توجه به توضیحات فوق و قابلیت‌های بالای این سنسور در کنار کاهش چشمگیر هزینه‌ها، دوربین‌های ToF که در دستگاه‌های iOS به عنوان اسکنر لیدار معروف است [15]، به زودی به یک کالای تجاری متداول تبدیل خواهد شد [10]. با مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه مشخص است که بسیاری از مقالات اخیر بر کاربرد دستگاه‌های تلفن همراه در تحقیقات مرتبط با علوم زمین تأکید کرده‌اند [16-21]. همچنین پلتفرم‌های موبایل در حال تبدیل شدن به بخشی ضروری از کار میدانی مرسوم علومی زمین (مانند نقشه‌برداری) هستند [21-23]. بنابراین روش‌هایی که در گذشته برای تعیین مرز قطعات به کار می‌رفتند، دیگر نمی‌توانند نیازهای امروزی که تصمیم‌ها باید به صورت آنی و با بالاترین دقت اتخاذ شوند، برآورده کنند. از این رو عصر، عصر گوشی‌های هوشمند است [1]. تا به امروز تحقیقات متعددی درباره قابلیت گوشی‌های هوشمند در تعیین مرز قطعات زمین انجام شده است که به موارد زیر می‌توان اشاره نمود.

Oluwadare و Salami به بررسی دو دستگاه مختلف برای تعیین مرزهای قطعات زمین پرداختند. در این پژوهش یک‌بار سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای جهانی (GNSS) تخصصی و بار دیگر گوشی هوشمند مورد ارزیابی قرار گرفت اگر چه نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد گیرنده GNSS دقت بهتری نسبت به گوشی هوشمند ارائه می‌کند. با این حال، قیمت گیرنده GNSS بسیار بالاتر از گوشی هوشمند است و بر اساس نتایج حاصل در بسیاری از موارد استفاده از گوشی هوشمند به جای گیرنده GNSS می‌تواند گزینه مناسبی باشد [1]. در پژوهش دیگر Zangenehnejad و Gao پیشرفت‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های آینده مرتبط با موقعیت‌یابی تلفن‌های هوشمند را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج حاصل، استفاده از تلفن‌های هوشمند برای بسیاری از کاربردها مانند نقشه‌برداری کاداستر و ناوبری به دلیل مقرون به صرفه بودن آن در حال افزایش است [24]. محمد عموشاهی و همکاران نیز برای بازسازی معماری داخلی ساختمان‌ها از گوشی‌های هوشمند استفاده نمودند که نتایج حاصل از این تحقیق رضایت‌بخش بوده و دقت دو سانتی‌متر در استفاده از گوشی‌های هوشمند را گزارش کردند [25].

با معرفی حسگر جدید لیدار در iPhone 12 pro و افزایش قابلیت این سیستم، مطالعات متعددی در مورد توانایی و دقت آن انجام شده است [26]. در چندین پژوهش داده‌های اسکنر iPhone در مقایسه با اسکنرهای تخصصی و دقیق نقشه‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [9, 27-28]. در برخی از پژوهش‌ها نیز این داده‌ها با ابرنقاط فتوگرامتری مقایسه شده‌اند [9, 30-31]. همچنین Heinrichs و Yang برای این منظور از اندازه‌گیری‌های دستی با متر به عنوان مبنا استفاده نمودند [32]. لازم به ذکر است که در پژوهش‌های انجام شده تأکید شده است که سنسورهای فعلی در گوشی‌های هوشمند تنها برای فضاهای کوچک و محدود مناسب هستند، مانند پژوهش Díaz و همکاران، مطابق گزارش آنها و با توجه به شکل (۱) ابعاد و زوایای دیوارها در اتاق اول به خوبی حفظ شده است. با این حال، کیفیت داده‌ها در اتاق دوم تحت تأثیر خطاهای بازسازی

قرار گرفته است [7].



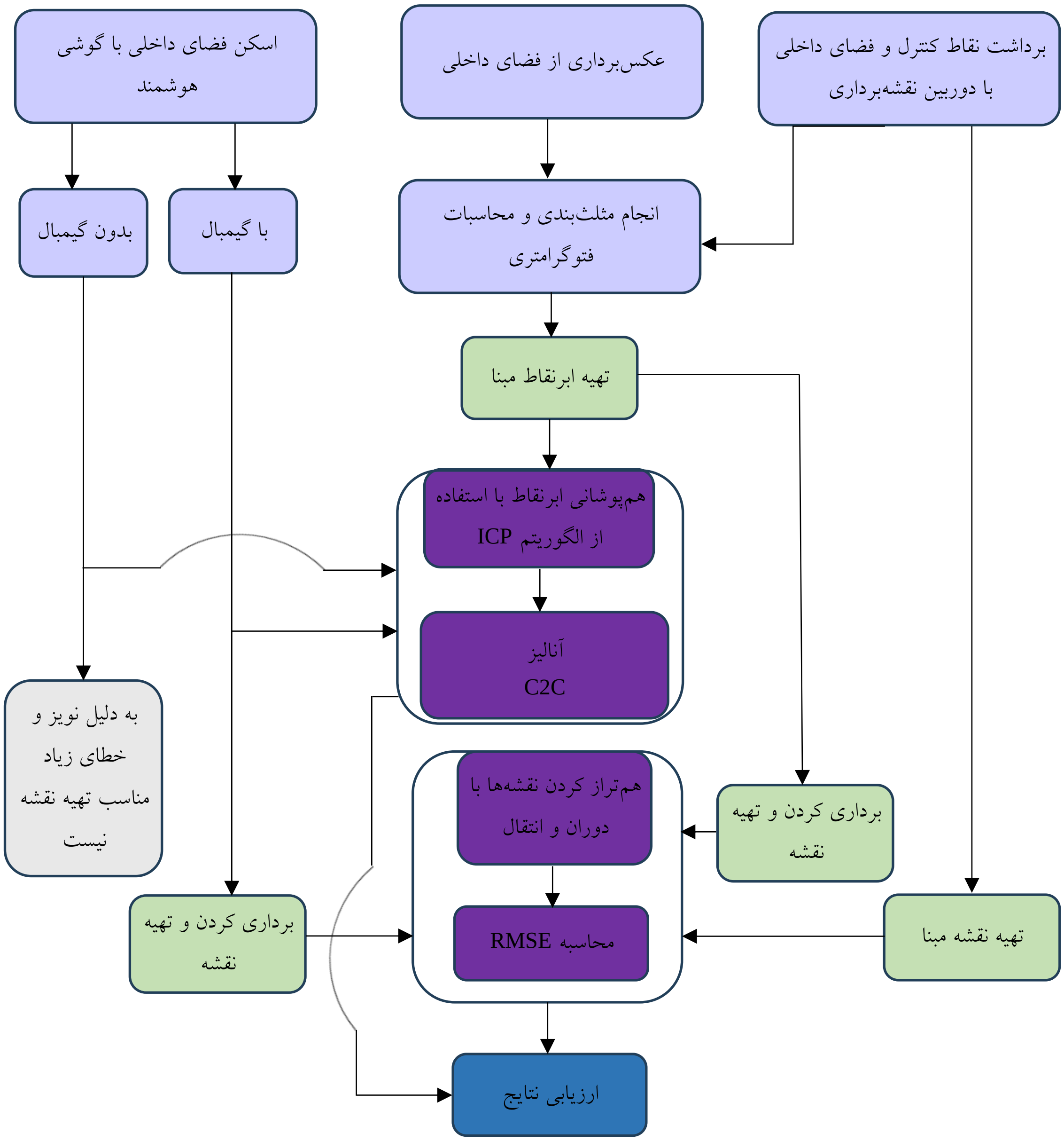
شکل ۱ ابرنقاط iPad (بنفش) و ابرنقاط TLS (سبز) [7]

طبق مطالب ارائه شده در تحقیق فوق دیوار بین اتاق یک و اتاق دو، ۱۰ سانتی‌متر ضخامت دارد، در حالی که بر اساس داده‌های اخذ شده توسط iPad Pro ضخامت دیوار بین دو اتاق حدود ۴۰ سانتی‌متر گزارش شده است [7]. علی رغم اینکه در این پژوهش چندین تلاش برای گرفتن بیش از دو اتاق متوالی انجام گرفته است، ابرنقاط حاصل برای بیش از دو اتاق به وضوح نادرست بودند. این پژوهش نشان می‌دهد که این دستگاه فقط برای نقشه‌برداری از محیط‌های کوچک مناسب است.

بر اساس تحقیقات انجام شده، قابلیت‌های گوشی‌های هوشمند در زمینه‌های مختلف نقشه‌برداری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بسیاری از پژوهش‌ها به ارزیابی و مستندسازی این قابلیت‌ها پرداخته‌اند، به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند اندازه‌گیری و تهیه مدل‌های سه‌بعدی از محیط‌های مختلف. به طور خاص، با معرفی اسکنر لیدار در گوشی‌های هوشمند، تحقیقات بسیاری به بررسی عملکرد این سنسور و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت داده‌های تولیدی آن پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها معمولا به ارزیابی دقت داده‌ها در نقاط چک محدود می‌شوند و از این رو، دقت نقشه‌برداری نهایی همچنان به طور کامل مشخص نشده است. در حالی که این تحقیقات، دستاوردهای مهمی در بهبود دقت و کارایی گوشی‌های هوشمند در نقشه‌برداری ارائه داده‌اند، اما پژوهش‌های اندکی به بررسی و بهبود قابلیت اسکن سه‌بعدی با استفاده از این ابزارها پرداخته‌اند. با توجه به این چالش‌ها، ضروری است که این ابزارها در راستای کاربردهای تخصصی نقشه‌برداری، بر اساس معیارهای استاندارد نقشه‌برداری مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. در این راستا، پژوهش حاضر به منظور ارزیابی عملکرد سنسور ToF در مدل iPhone 12 Pro، تمرکز خود را بر تهیه مدل سه‌بعدی از فضای داخلی ساختمان قرار داده است. در این مطالعه، دقت ابرنقاط حاصل از اسکنر سه‌بعدی iPhone با ابرنقاط به دست آمده از روش فتوگرامتری در چهار اتاق مختلف مقایسه شد. نتایج این بررسی‌ها، همچنین تأثیر استفاده از گیمبال در فرایند اسکن را نیز مورد تحلیل قرار داده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که استفاده از گیمبال تأثیر قابل توجهی بر دقت و کیفیت اسکن انجام شده با iPhone دارد که این امر می‌تواند به طور قابل‌ملاحظه‌ای دقت مدل‌های سه‌بعدی تولید شده را بهبود بخشد.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر به منظور بازسازی مدل اطلاعات ساختمان طبق چارچوب شکل (۲) عمل شده است. در این پژوهش در گام اول به وسیله دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن، نقاط کنترل داخلی طراحی شده همچنین کلیه فضاهای داخلی برداشت و بر اساس آن نقشه مبنای داخلی ساختمان تهیه گردید. سپس بر اساس طراحی صورت گرفته از فضاهای داخلی عکس‌برداری شد و بر اساس عکس‌های حاصل و با استفاده از نقاط کنترل برداشت شده با دوربین توتال استیشن اقدام به انجام مثلث‌بندی و تولید ابرنقاط دقیق و قابل اعتماد با دقتی در حد میلی‌متر با استفاده از روش فتوگرامتری گردید. سپس محیط داخلی خانه در ۶ مرحله با گوشی هوشمند مجهز به سیستم مدت پرواز اسکن شد. سه مرحله بدون گیمبال و سه بار با گیمبال. در نهایت نقشهٔ برداری با استفاده از ابرنقاط و رگرسیون خطی تهیه و خطای ریشه میانگین مربعات برای آن محاسبه و مدل اطلاعات ساختمان از فضاهای داخلی تهیه گردید، و سرانجام محصولات نهایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه مراحل پژوهش، با جزئیات بیشتر شرح داده خواهند شد.



شکل ۲ چارچوب نظری پژوهش

برداشت نقاط کنترل و فضای داخلی با دوربین نقشه‌برداری

یکی از دقیق‌ترین روش‌های تهیه داده‌های مکانی سه‌بعدی، استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن است؛ بنابراین داده‌های حاصل از این ابزار می‌تواند به عنوان مبنای عمل دیگر تکنولوژی‌های جدید مانند فتوگرامتری، لیدار و تلفن هوشمند قرار گیرد. هدف از این مرحله تهیه نقاط کنترل و نقشه مبنا برای استفاده در مراحل بعدی است. نقاط کنترل در فرایند تهیه ابرنقاط مبنا مورد استفاده قرار می‌گیرند و استفاده از نقاط کنترل دقیق، موجب تولید ابرنقاط معتبر و دقیقی می‌شود. در واقع این نقاط کنترل برای تعریف مبنا و سیستم مختصات محلی در فرایند تولید ابرنقاط سه‌بعدی با استفاده از روش فتوگرامتری، به کار گرفته خواهند شد. علاوه بر آن، از دوربین نقشه‌برداری برای تهیه نقشه مبنا به منظور ارزیابی دقت و مقایسه آن با نقشه تست حاصل از اسکنر آیفون استفاده می‌شود.

عکس‌برداری و تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری

در پروژه‌های فتوگرامتری برد کوتاه، طراحی شبکه اولین و مهم‌ترین گام در انجام پروژه است، چرا که این مرحله تأثیر

مستقیمی بر دقت نهایی نتایج خواهد داشت. طراحی صحیح و مناسب شبکه تصویربرداری می‌تواند به طور چشمگیری دقت داده‌های مکانی تولید شده را بهبود بخشد. امیر شاهرخ امینی و همکاران در پژوهشی که به بررسی تأثیر پارامترهای رابطه اساسی طراحی شبکه بر دقت نهایی فتوگرامتری برد کوتاه پرداخته‌اند، نشان دادند که یکی از عوامل کلیدی در بهبود دقت نهایی، افزایش تعداد تصاویر اخذ شده از هر ایستگاه تصویربرداری است. علاوه بر این، آنها تأکید کردند که آرایش مناسب ایستگاه‌های تصویربرداری، به طوری که بزرگ‌ترین حجم هرم فضایی را تشکیل دهند، می‌توانند تأثیر زیادی در بهبود دقت نتایج نهایی داشته باشد. به عبارت دیگر، انتخاب موقعیت‌های مناسب برای ایستگاه‌های تصویربرداری و ترکیب مناسب آنها باعث افزایش دقت مدل‌های سه‌بعدی و نقاط شیء می‌شود که در نهایت دقت فتوگرامتری برد کوتاه را بهبود می‌بخشد [33]. مراحل پس از طراحی شبکه شامل، طراحی موقعیت قرار گرفتن تارگت‌ها و تعریف دیتوم، طراحی ایستگاه‌ها و زوایای مناسب عکس‌برداری پیش‌پردازش تصاویر، مثلث‌بندی ـ سرشکنی ـ کالیبراسیون، حذف نویز و ترمیم ابرنقاط میباشد [25]. که در این پژوهش نیز به منظور تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری بر اساس چارچوب فوق عمل شد.

اسکن محیط با و بدون گیمبال

در پژوهشی که توسط Giuseppina Vacca صورت گرفت، چهار اپلیکیشن اسکن سه‌بعدی شامل Polycam, SiteScape, 3D Scanner app, Scaninverse مقایسه و دقت هر یک در شرایط مختلف با لیزر اسکنر زمینی (TLS) ارزیابی شد که با توجه به نتایج قابل قبول اپلیکیشن Scaninverse، در این پژوهش نیز انتخاب گردید [34]. علاوه بر موارد فوق، رایگان بودن آن و همچنین امکان خروجی گرفتن به انواع فرمت‌های رایج (FBX, OBJ, GLB, USDZ, STL, PLY, LAS) از دیگر مزیت های مهم این اپلیکیشن می‌باشد.

در تمام مراحل اسکن باید شرایط یکسان شامل تنظیمات اسکن، ایستگاه‌ها و زوایای اسکن، خنکی دستگاه و... فراهم باشد تا بتوان ارزیابی صحیحی داشت. برای مقایسه ابتدا باید ابرنقاط با یکدیگر هم‌تراز شوند که برای این امر الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری (ICP) استفاده خواهد شد. الگوریتم ICP یک شیوه متداول به منظور هم‌تراز نمودن مدل‌ها و ابرنقاط سه‌بعدی است. این الگوریتم برای تطبیق، از هندسه و شکل مدل سه‌بعدی استفاده می‌کند [35]. این الگوریتم ابرنقاط بین دو مجموعه داده را به صورت تکراری به هم نزدیک می‌کند تا به حد مناسبی از تطبیق برسد. پس از آن با استفاده از ابزار cloud to cloud distance فاصله بین ابر نقاط تست و ابرنقاط مبنا محاسبه و نتیجه به صورت ابرنقاط سه بعدی با طیف رنگی معنادار نمایش داده می‌شود.

برداری‌سازی ابرنقاط و تهیه نقشه

مدل‌های سه‌بعدی ابرنقاط به دلیل حجم عظیم اطلاعاتی که شامل می‌شوند، فضای زیادی را در سیستم ذخیره‌سازی اشغال کرده و این امر می‌تواند منجر به دشواری‌هایی در پردازش و کار با این داده‌ها، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، شود؛ بنابراین، به‌منظور تسهیل کار با این داده‌ها، ضروری است که فرایند برداری‌سازی انجام شود تا داده‌های غیر ضروری حذف گردیده و تنها اطلاعات مفید با حجم کمتری ذخیره شوند. این مرحله باعث کاهش حجم داده‌ها و بهبود کارایی سیستم در پردازش مدل‌های سه‌بعدی می‌شود. پس از اعمال برداری‌سازی، ابرنقاط وارد نرم‌افزار Recap می‌شوند، جایی که در محیط نرم‌افزاری Recap فرایند ساختاردهی داده‌ها و سازمان‌دهی اطلاعات انجام می‌گیرد. در این مرحله، داده‌ها به فرمت استاندارد rcp تبدیل می‌شوند که برای استفاده در نرم‌افزار Civil 3D مناسب و سازگار است. در نرم‌افزار Civil 3D نیز پس از بارگذاری داده‌ها، با استفاده از ابزارهای مختلف، مقاطع مناسب تهیه شده و با بهره‌گیری از روش‌هایی مانند رگرسیون خطی، نقشه‌های دوبعدی از مدل سه‌بعدی ایجاد می‌شود. این فرایندها به طور مؤثر به تسهیل تحلیل‌های مهندسی و طراحی‌های دقیق کمک می‌کنند.

محاسبه RMSE

خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) معیاری است که به طور گسترده برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [36]. به منظور بررسی دقت نقشه‌های برداری در این پژوهش نیز ابتدا تمام نقشه‌ها با انتقال و دوران روی نقشه دقیق حاصل

از دوربین توتال استیشن همتراز می‌شود و سپس مختصات تمام گوشه‌های نقشه‌های مبنا با مختصات تمام گوشه‌های نقشه‌های تست در رابطه (۱) جای‌گذاری خواهد شد.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (۱)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی یک طبقه از ساختمانی دو طبقه که دارای چهار اتاق می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برداشت نقاط کنترل و فضای داخلی با دوربین نقشه‌برداری

در این مرحله، با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن و قرائت مختصات ۱۶۹ نقطه، دیتوم به‌صورت محلی و بادقت بسیار بالا تعیین شد (شکل ۳). دوربین مورداستفاده دارای دقت طول‌یابی ۲ میلیمتر و دقت زاویه‌ای دو ثانیه است. همچنین دقت توجیه ایستگاه‌ها حداکثر یک میلیمتر بود.



شکل ۳ قرائت نقاط کنترل به‌صورت محلی

با توجه به رابطه انتشار خطا و جای‌گذاری فرمول محاسبه مختصات در آن خطای مختصات قرائت شده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\delta z\right)^2 + \cdots}$$

$$X_2 = X_1 + L_{12}\sin(G_{12})$$

$$Y_2 = Y_1 + L_{12}\cos(G_{12})$$

(۲)

خطای مختصات X

$$\delta X = \sqrt{(1)^2(\delta X_1)^2 + (\sin(G_{12}))^2(\delta L)^2 + (L\cos(G_{12}))^2(\delta G_{12})^2}$$

$$\delta X = \sqrt{(1)^2(0.001)^2 + (1)^2(0.002)^2 + (10)^2(0.00001)^2}$$

$$\delta X = \sqrt{0.000001 + 0.000004 + 0.000001} \approx 0.002\mathrm{m}$$

(۳)

همچنین خطای مختصات Y

$$\delta Y = \sqrt{(1)^2(\delta Y_1)^2 + (\sin(G_{12}))^2(\delta L)^2 + (-L\sin(G_{12}))^2(\delta G_{12})^2}$$

$$\delta Y = \sqrt{(1)^2(0.001)^2 + (1)^2(0.002)^2 + (10)^2(0.00001)^2}$$

$$\delta Y = \sqrt{0.000001 + 0.000004 + 0.000001} \approx 0.002\mathrm{m}$$

(۴)

دقت مسطحاتی کل:

$$\delta XY = \sqrt{\delta X^2 + \delta Y^2} = \sqrt{0.002^2 + 0.002^2} = 0.002\mathrm{m}$$

(۵)

بنابراین، خطای موقعیت‌های به دست آمده ۲ میلی‌متر است و می‌توان از این نقاط به عنوان نقاط مبنا یا نقشه مبنا استفاده نمود.

عکس‌برداری و تهیه ابرنقاط با استفاده از روش فتوگرامتری

برای تهیه ابرنقاط مبنا در این پژوهش ابتدا با استفاده از رابطه کلی انتشار خطا (رابطه ۶) محاسبات طراحی شبکه انجام شد:

$$\overline{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}}.S.\sigma = \frac{q}{\sqrt{k}}.\frac{d}{f}.\sigma = \frac{q}{\sqrt{k}}.d.\sigma_a \qquad (۶)$$

$\overline{\sigma}_c$ متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شی می‌باشد که با توجه به الزامات کاداستر مسکونی در ایران این مقدار نباید از پنج سانتی‌متر بیشتر باشد. البته در این تحقیق به‌منظور دستیابی به دقت بالاتر این مقدار یک سانتی‌متر مد نظر

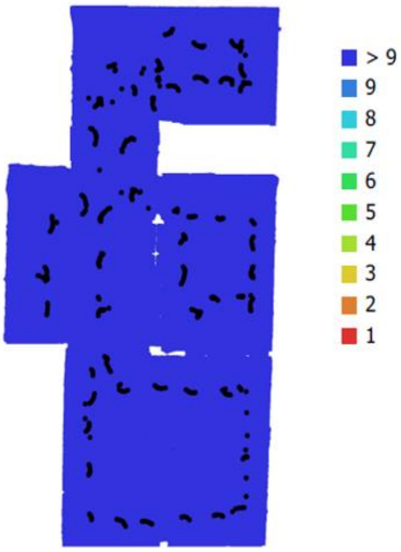
قرار گرفت. q که ضریب استحکام هندسی شبکه است ۰٫۷ در نظر گرفته شد، k که نشان دهنده تعداد تصاویر در هر ایستگاه است یک می‌باشد، فاصله کانونی دوربین یا همان f، ۴٫۲ میلی‌متر است و σ نیز که نماد خطای متوسط مختصات xy نقاط عکسی است معادل ۸ میکرون می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$0.01 \ge \frac{0.7}{\sqrt{1}} \times \frac{d}{0.0042} \times 8 \times 10^{-6} \to d \le 7.5$$

در این تحقیق، تعداد ۵۴۶ تصویر با استفاده از گوشی iPhone 12 Pro ثبت شد. ایستگاه‌های عکس‌برداری به طور منظم در فواصل ۱ تا ۱٫۵ متر از یکدیگر قرار گرفتند تا پوشش مکانی مناسبی فراهم شود. در هر ایستگاه، برای اطمینان از هم‌پوشانی بالای ۹۰ درصد بین تصاویر و دستیابی به دقت و وضوح بالاتر در فرایند مدل‌سازی، عکس‌برداری از زوایای مختلف و متنوع انجام شد. این اقدام به ویژه در فتوگرامتری برد کوتاه اهمیت دارد زیرا هم‌پوشانی بالا باعث بهبود دقت نتایج نهایی و کاهش خطاهای هندسی در مدل سه‌بعدی می‌شود.

شکل (۴) نحوه قرارگیری ایستگاه‌های عکس‌برداری و میزان هم‌پوشانی تصاویر را نشان می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی دقت ابرنقاط حاصل از فتوگرامتری، تعداد ۳۱ نقطه از مجموع ۱۶۹ نقطه به عنوان نقاط چک انتخاب شدند. این نقاط چک به طور سیستماتیک در محیط‌های مختلف توزیع شدند تا دقت مدل‌های سه‌بعدی تولید شده مورد ارزیابی قرار گیرد. توزیع و تراکم نقاط کنترل و نقاط چک در اتاق‌های مختلف به‌صورت زیر بوده است: در اتاق ۱، ۵۰ نقطه کنترل و ۱۰ نقطه چک؛ در اتاق ۲، ۳۰ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک؛ در اتاق ۳، ۳۳ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک؛ و در اتاق ۴، ۲۵ نقطه کنترل و ۷ نقطه چک. گزارش نهایی ارائه شده توسط نرم‌افزار نشان می‌دهد که مدل سه‌بعدی تولید شده از فتوگرامتری دارای دقت مناسب و قابل قبولی است و می‌توانند به عنوان مبنای مقایسه با ابرنقاط به دست آمده از اسکنر iPhone مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۲) نتایج مقایسه این دو مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴ موقعیت دوربین‌ها و درجه هم‌پوشانی تصاویر

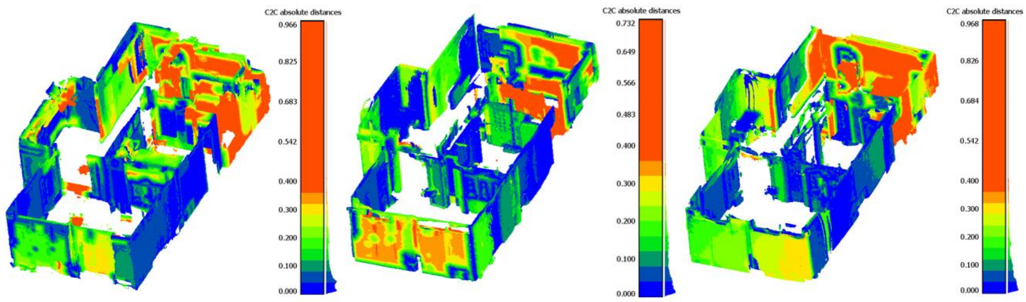
جدول ۲ خطای نقاط کنترل و نقاط چک

	تعداد	خطای x (mm)	خطای y (mm)	خطای z (mm)	خطای مسطحاتی (mm)	خطای کل (mm)
نقاط کنترل	۱۳۸	۱٫۱۱	۱٫۱۳	۰٫۷۹	۱٫۵۹	۱٫۷۷
نقاط چک	۳۱	۱٫۱۵	۱٫۱۱	۰٫۷۱	۱٫۶۰	۱٫۷۵

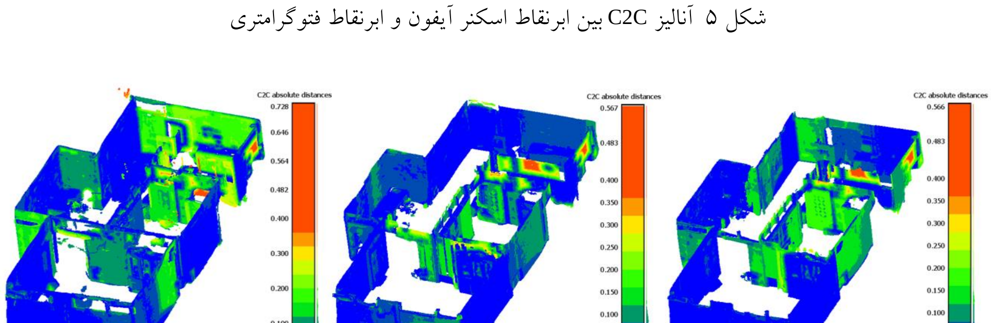
اسکن محیط با و بدون گیمبال

در این مرحله فضای داخلی چهار اتاق با ابعاد کلی 12×6 سه بار به طور معمولی و سه بار با استفاده از گیمبال اسکن شد. تنظیمات اسکن در تمام مراحل کاملا مشابه اعمال گردید، همچنین نقاط ثابتی روی زمین نشانه‌گذاری شد تا در هر مرحله، از مسیر یکسان اسکن انجام شود. سپس خروجی ابرنقاط با استفاده از فیلتر نویز در نرم‌افزار cloudcompare بهبود داده شد. این الگوریتم ابتدا یک صفحه به صورت محلی (در اطراف هر نقطه از ابرنقاط) فیت می‌کند، سپس نقاطی که از صفحه دور هستند را حذف می‌کند. این فیلتر را می‌توان در اصل یک فیلتر پایین گذر در نظر گرفت (CloudCompare User Manual). در نهایت خروجی PLY از هر دو حالت اسکن با ابرنقاط فتوگرامتری مقایسه گردید. به منظور مقایسه ابتدا باید ابرنقاط با یکدیگر همتراز شوند که برای این منظور از الگوریتم ICP استفاده شد. البته باید به این نکته توجه شود که در این فرایند پارامتر مقیاس به منظور حفظ هندسه مدل‌ها اعمال نشده است و تنها انتقال و دوران‌ها در سه محور انجام گردید. پس از آن با استفاده از آنالیز ابر به ابر (C2C) فاصله بین ابرنقاط مبنا و تست محاسبه گردید خطاهای موجود با استفاده از طیف رنگی در شکل (۵) نمایش داده شده است.

در شکل (۵)، نقاط با رنگ آبی دقت بالایی دارنـد و دارای خطایی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر هستند. نقاط سبزرنگ نشان دهنده خطایی بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر و نقاط زردرنگ معـرف خطـای حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌باشند. همچنـین، رنـگ‌هـای نـارنجی و قرمز به ترتیب خطاهایی حدود ۳۵ سانتی‌متر و بیشـتر را نشـان می‌دهند. این توزیـع متفـاوت در خطـا بـه دلیـل ویژگـی‌هـای سیستم‌های اسکن لیزری سیار است که از الگوریتم مکان‌یـابی و نقشه‌برداری هم‌زمان (SLAM) برای اسکن بلادرنگ و تخمـین دقیق موقعیت دستگاه در محـیط‌هـای پیچیـده،ماننـد فضـاهای داخلی، بهره می‌برند. با این حال، سیسـتم اسـکنر لیـزری سـیار (MLS) که در تلفن همراه آیفون به کار رفته است، در معـرض چالش‌هایی قرار دارد. این چالش‌ها بیشـتر ناشـی از اخـتلال در موقعیت‌یابی دستگاه به دلیل لرزش‌ها و حرکات ناگهانی دسـت کاربر است که موجب کاهش دقت اسکن مـی‌شـود. افـزون بـر این، اسکنر و استابلایزر موجود در این دستگاه‌ها به طور خاص برای کاربردهای دقیق طراحی نشده‌اند؛ این موضوع باعث ایجاد ناهماهنگی در موقعیت‌یابی و تطابق نقاط اسکن‌شده در برداشت مسافت‌های طولانی می‌شود. به منظور کـاهش اثـرات ناشـی از لرزش و حرکات ناگهانی دسـت، از یـک گیمبـال Smooth Q4 استفاده شده است. این اقـدام بـا هـدف بهبـود دقـت اسـکن و کاهش مشکلات مربوط به خطای اسـکن‌هـای چندگانـه انجـام شده است (شکل ۶).



شکل ۵ آنالیز C2C بین ابرنقاط اسکنر آیفون و ابرنقاط فتوگرامتری



شکل ۶ آنالیز C2C بین ابرنقاط اسکنر iPhone با استفاده از گیمبال و ابرنقاط فتوگرامتری

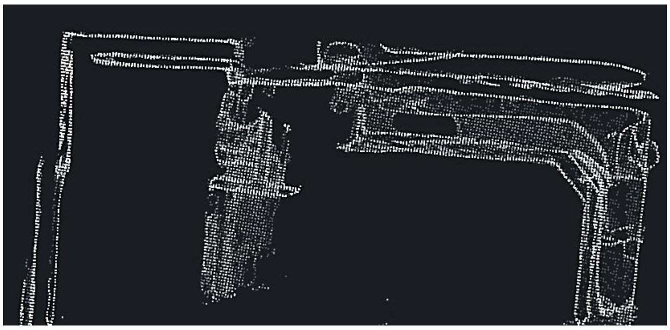
همان طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از استفاده از گیمبال به طور قابل توجهی بهبود یافته است. در این مرحله، بیشتر دیوارها به رنگ آبی دیده می‌شوند که نشان دهنده خطای کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در این نواحی است. همچنین، ابرنقاط قرمز رنگ که نمایانگر خطاهایی بالاتر از ۳۵ سانتی‌متر بودند، تقریبا حذف شده‌اند، که این امر نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در خطاهای اسکن است. با این حال، هنوز در بسیاری از قسمت‌ها ابرنقاط به رنگ سبز مشاهده می‌شود. این نکته حاکی از آن است که علی رغم بهبودهای اعمال شده، برخی از چالش‌ها و خطاها همچنان در مقیاس‌های متوسط باقی مانده‌اند. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از محدودیت‌های فنی دستگاه باشد که نیاز به بهبود بیشتر در پژوهش‌های آینده دارد.

برداری‌سازی ابرنقاط و تهیه نقشه

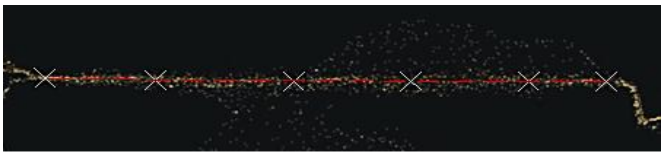
در فرایند برداری‌سازی ابرنقاط، تنها داده‌های حاصل از اسکن سه‌بعدی با استفاده از گیمبال به کار گرفته شد. داده‌های اسکن شده بدون گیمبال به دلیل کیفیت پایین، فاقد دقت لازم برای تهیه نقشه‌های دقیق بودند (شکل ۷). این مشکل عمدتا به دلیل لرزش‌ها و حرکات ناگهانی دست در هنگام اسکن رخ داد که منجر به ایجاد خطای اسکن چندگانه و نویز در داده‌ها شد. این ناپایداری‌ها موجب از دست رفتن انسجام ابرنقاط و عدم امکان استخراج دقیق خطوط و سطوح گردید؛ بنابراین، استفاده از گیمبال برای تثبیت دستگاه ضروری است، زیرا موجب بهبود کیفیت داده‌های اولیه شده و امکان برداری‌سازی و پردازش دقیق‌تر را فراهم می‌کند.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که برخی دیوارها به دلیل اسکن چندگانه و مختصات متفاوت برای شیء یکسان، به درستی ثبت نشده‌اند و فاصله میان این اسکن‌ها مانع از تشخیص دقیق مرزها شده است. به همین دلیل، این ابرنقاط از فرایند برداری‌سازی حذف شدند. در مقابل، تنها ابرنقاطی که با استفاده از گیمبال به دست آمده بودند، انتخاب و از طریق رگرسیون خطی برای برداری‌سازی استفاده شدند که نحوه برداری‌سازی در شکل (۸) نمایش داده شده است.

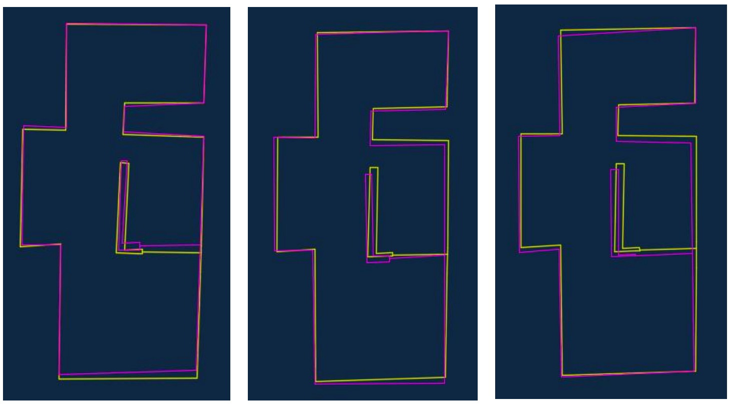
به منظور ارزیابی دقت داده‌های اسکن شده، از نقشه‌ای که با دستگاه دقیق «توتال استیشن» برداشت شده بود به عنوان نقشه مرجع استفاده گردید. برای این مقایسه، ابتدا نقشه‌های حاصل از اسکن سه‌بعدی به نقشه مرجع هم‌تراز شدند تا امکان تطبیق هندسی فراهم شود. بررسی نتایج پس از این هم‌ترازی نشان داد که هندسه اتاق‌ها به طور نسبی با دقت متوسطی حفظ شده است (شکل ۹). این موضوع بیانگر آن است که داده‌های حاصل از سیستم اسکن سه‌بعدی، اگر چه دقتی هم‌سطح با توتال استیشن نداشتند، اما همچنان توانسته‌اند بخش عمده‌ای از ویژگی‌های هندسی محیط را به درستی ثبت نمایند.



شکل ۷ نمای عمودی از برش ابرنقاط حاصل از اسکنر iPhone بدون گیمبال



شکل ۸ برش عرضی از ابرنقاط و ترسیم نقشه دوبعدی با استفاده از رگرسیون خطی



شکل ۹ هم‌پوشانی نقشه مبنا (زرد) با نقشه حاصل از اسکنر iPhone با استفاده از گیمبال (صورتی)

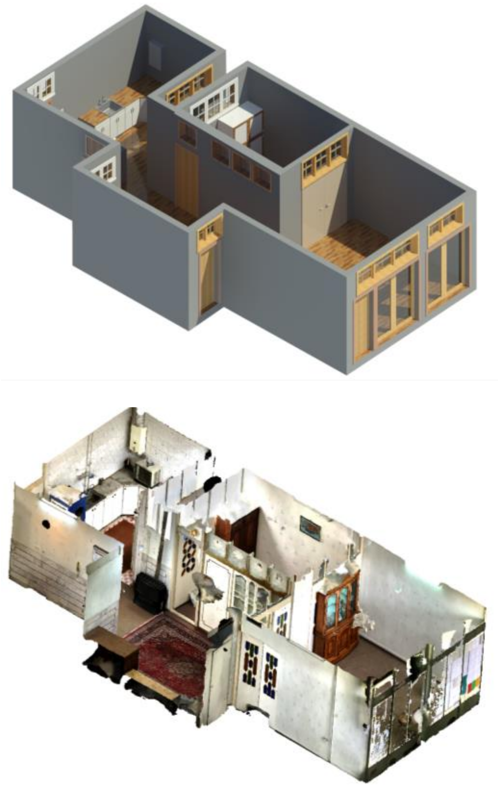
محاسبه RMSE

در این مطالعه، نقشه‌های حاصل از داده‌های ابرنقاط برای تحلیل و مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقت این نقشه‌ها، تفاوت مختصات ۲۰ نقطه خاص از گوشه‌های خطوط که با استفاده از دستگاه توتال استیشن برداشت شده بودند، با مختصات محاسبه شده در نقشه‌های ابرنقاط مورد بررسی قرار گرفت. برای این مقایسه، از معیار خطای RMSE استفاده شد تا انحراف مختصات به دست آمده از داده‌های ابرنقاط نسبت به نقشه مرجع تعیین شده توسط توتال استیشن ارزیابی شود (جدول ۳).

جدول ۳ خطای RMSE نقشه‌های دوبعدی

	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE (m)
فتوگرامتری	۰,۰۰۸	۰,۰۱۱	۰,۰۱۴
آیفون + گیمبال ۱	۰,۱۱۳	۰,۱۶۸	۰,۲۰۳
آیفون + گیمبال ۲	۰,۰۸۴	۰,۱۴۸	۰,۱۷۱
آیفون + گیمبال ۳	۰,۰۵۰	۰,۱۴۵	۰,۱۵۳

در نهایت، با توجه به پیشرفت‌های ایجاد شده در دقت ابرنقاط (شکل ۶) و امکان تولید نقشه‌های خطی دقیق‌تر، همچنین با استفاده از اسناد و نقشه‌های دوبعدی موجود از ساختمان و اطلاعات حاصل از مشاهدات میدانی به عنوان داده‌های معنایی تکمیلی، می‌توان مدل سه‌بعدی ساختمان را با دقت مکانی قابل قبول و در عین حال با جزئیات دقیق تولید کرد (شکل ۱۰). این فرایند، امکان بازسازی دقیق و جامع مدل‌های سه‌بعدی را فراهم می‌آورد.



شکل ۱۰ تهیه مدل اطلاعات ساختمان معتبر و منطبق بر واقعیت با استفاده از نقشه دوبعدی و اطلاعات سه‌بعدی ابرنقاط

بحث

همان طور که از شکل‌های (۵) و (۶) نیز مشخص است، اسکن معمولی با استفاده از لیدار گوشی هوشمند برای تهیه نقشه‌های دقیق و معتبر مناسب نیست. به ویژه در شرایطی که هدف تهیه نقشه برای چهار اتاق مختلف باشد، زیرا ابرنقاط از یک اتاق به اتاق بعدی به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر خطاها و اشتباهات

قرار می‌گیرند و این خطاها به صورت تجمعی افزایش می‌یابند. در این حالت، ابرنقاط به هیچ وجه دقت هندسی قابل قبولی ندارند و صرفا برای کاربردهای نمایشی و هنری مناسب خواهند بود. با این حال، پس از استفاده از گیمبال، بسیاری از نویزها و قرائت‌های چندگانه و متفاوت برطرف شدند و در آنالیز C2C، بیشتر قسمت‌ها به رنگ آبی و سبز نمایش داده شدند، در حالی که رنگ زرد و قرمز به حداقل رسید، که نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی بود. بنابراین، علاوه بر اینکه امکان برداری‌سازی ابرنقاط با استفاده از رگرسیون خطی فراهم شد، ابهامات موجود در دقت نقشه‌های برداری نیز برطرف گردید. چرا که فرایند برداری‌سازی ابرنقاط معمولا با کاهش دقت همراه است. به عنوان مثال، در فتوگرامتری، خطای نقاط چک ۲ میلی‌متر بود که پس از برداری‌سازی، این خطا به ۱٫۵ سانتی‌متر افزایش یافت.

با این‌وجود، باید توجه داشت که در آنالیز C2C، در مقایسه با ابرنقاط حاصل از فتوگرامتری، بسیاری از قسمت‌ها همچنان به رنگ سبز دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده این حقیقت است که حتی با استفاده از گیمبال نیز این دستگاه برای کاربردهای دقیق، همچنان مناسب نمی‌باشد. در نهایت، RMSEهای محاسبه شده نیز این موضوع را تأیید می‌کند. اگر چه این پژوهش محدود به یک طبقه از ساختمان بود، اما نتایج آن می‌تواند مسیر را برای پژوهش‌های آینده در تمامی طبقات، از جمله قسمت‌های داخلی، خارجی و نمای ساختمان، هموار کند. چالش اصلی در این مسیر، تلفیق ابرنقاط به دست آمده از بخش‌های مختلف ساختمان و هم‌تراز کردن آنها در یک سیستم مختصات واحد است. این موضوع نیازمند توجه دقیق به روش‌های هم‌ترازی و یکپارچه‌سازی داده‌ها در سطوح مختلف است تا نقشه‌ها و مدل‌های دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری تولید شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، قابلیت سنسور لیدار گوشی‌های هوشمند در بازسازی فضای داخلی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ابرنقاط حاصل از اسکن تنها با استفاده از گوشی هوشمند، به دلیل محدودیت‌های دقت، برای تولید نقشه‌های دقیق و معتبر مناسب نیستند. این یافته‌ها بر لزوم استفاده از تکنولوژی‌های تکمیلی برای بهبود دقت اسکن‌ها تأکید می‌کند. با استفاده از گیمبال و انجام اصلاحات لازم، بهبود قابل توجهی در کیفیت ابرنقاط مشاهده شد که منجر به کاهش خطا و افزایش دقت مدل‌سازی گردید. در نتیجه، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) نقشه‌برداری نهایی به طور میانگین ۱۷٫۶ سانتی‌متر محاسبه شد و مدل سه‌بعدی وضعیت موجود ساختمان با دقتی متوسط تولید شد. این نتایج نشان می‌دهند که علی‌رغم محدودیت‌ها، استفاده از سنسور لیدار گوشی‌های هوشمند در پروژه‌های نقشه‌برداری و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند در آینده تحولی در عملیات میدانی ایجاد کند. با این حال، چالش‌هایی در استفاده از این سنسورها برای کاربردهای دقیق همچنان باقی است. محدودیت‌های دقت اسکن، فواصل محدود اسکن (حداکثر تا ۵ متر) و کاهش دقت در مسافت‌های طولانی‌تر از جمله مشکلات اصلی به شمار می‌روند. این مسائل تأکید می‌کنند که برای دستیابی به دقت بالاتر در نقشه‌برداری‌های میدانی، نیاز به بهبود سنسورها و الگوریتم‌های پردازشی داریم. با این وجود، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و بهبود سنسورهای لیدار در دستگاه‌های آینده می‌تواند امکان تولید داده‌های سه‌بعدی دقیق و معتبر مبتنی بر موبایل را فراهم سازد. چنین داده‌هایی می‌توانند در کاربردهای مختلفی مانند مدیریت شهری، تحلیل‌های سه‌بعدی، بازار املاک، ثبت اسناد و بسیاری دیگر مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، بررسی و ارزیابی روش‌های تلفیقی، عوامل مؤثر در بهبود قابلیت اسکن، کاهش نویز و خطا، و توسعه الگوریتم‌های پیشرفته به‌منظور بهبود دقت مدل‌سازی می‌تواند به ارتقای این فناوری کمک کند. همچنین، امکان‌سنجی تهیه داده‌های سه‌بعدی شهری به صورت مردم گستر و بادقت بالا، به عنوان یک موضوع مهم، می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد.

واژه‌نامه

مدل اطلاعات ساختمان

BIM (Building Information Modeling)

معماری، مهندسی و ساخت و ساز

AEC (Architecture, Engineering, and Construction)

فاصله ابر به ابر C2C (Cloud-to-Cloud distance)

واحد اندازه‌گیری اینرسی IMU (Inertial Measurement Unit)

سامانه موقعیت‌یاب جهانی

GPS (Global Positioning System)

اسکنر لیزری زمینی TLS (Terrestrial Laser Scanning)

زمان پرواز ToF (Time of Flight)

موقعیت‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

سیستم‌عامل آیفون iOS (iPhone Operating System)

سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی

GNSS (Global Navigation Satellite System)

نزدیک‌ترین نقطه تکرار شونده ICP (Iterative Closest Point)

ریشه میانگین مربعات خطا

RMSE (Root Mean Square Error)

اسکن لیزری متحرک MLS (Mobile Laser Scanning)

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مجموعه نشریه مهندسی عمران فردوسی و سردبیر محترم آن، جناب آقای دکتر محمدرضا اصفهانی، به دلیل کمکهای صبورانه و سخاوتمندانه‌شان در انتشار این مقاله صمیمانه تشکر می‌کنند.

مراجع

[1] C., Oluwadare and M., Salami,"Comparative Analysis of Smartphones and Survey-Grade GNSS Receivers for Parcel Boundary Determination", Journal of Geoinformatics & Environmental Research, 3(01), Pp. 10–22. https://www.academia.edu/82813867/Comparative_Analysis_of_Smartphones_and_Survey_Grade_GNSS_Receivers_for_Parcel_Boundary_Determination, (2022).

[2] S.D.G., Arabinda, "Smartphone as a Real-time and Participatory Data Collection Tool for Civil Engineers", International Journal of Modern Computer Science. https://www.researchgate.net/publication/267313743_Smartphone_as_a_Real-time_and_Participatory_Data_Collection_Tool_for_Civil_Engineers, (2014).

[3] K. J. W., McCaffrey, R. R., Jones, R. E., Holdsworth, R. W., Wilson, P., Clegg, J., Imber, N., Holliman and I.,Trinks, "Unlocking the spatial dimension: Digital technologies and the future of geoscience fieldwork", Journal of the Geological Society, 162(6), 927–938. https://doi.org/10.1144/0016-764905-017, (2005).

[4] S., Tavani, A., Billi, A., Corradetti, M., Mercuri, A., Bosman, M., Cuffaro, T., Seers and E.,Carminati, "Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones", Earth-Science Reviews, 227, 103969. https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV .2022.103969, (2022).

[5] K., Khoshelham, H., Tran and D., Acharya, "Indoor mapping eyewear: Geometric evaluation of spatial mapping capability of hololens", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(2/W13), 805–810. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W13-805-2019, (2019).

[6] H., Patrick, S., Landgraf, W., Martin and S., Wursthorn, "Evaluation of the Microsoft HoloLens for the Mapping of Indoor Building Environments", Conference: Dreiländertagung Der DGPFDer OVG Und Der SGPFAt: Wien. https://www.researchgate.net/publication/331311412_Evaluation_of_the_Microsoft_HoloLens_for_the_Mapping_of_Indoor_ Building_Environments, (2019).

[7] L., Díaz-Vilariño, H., Tran, E., Frías, J., Balado and K., Khoshelham, "3D MAPPING OF INDOOR AND

OUTDOOR ENVIRONMENTS USING APPLE SMART DEVICES", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 43(B4-2022), 303–308. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B4-2022-303-2022, (2022).

[8] S., Xia, D., Chen, R., Wang, J., Li and X., Zhang, "Geometric Primitives in LiDAR Point Clouds: A Review", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 685–707. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2969119, (2020).

[9] A., Murtiyoso, P., Grussenmeyer, T., Landes and H., Macher, "First assessments into the use of commercial-grade solid state lidar for low cost heritage documentation", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 43(B2-2021), 599–604. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B2-2021-599-2021, (2021).

[10] M., Reynolds, J., Doboš, L., Peel, T., Weyrich and G. J., Brostow, "Capturing Time-of-Flight data with confidence", Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 945–952. https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995550, (2011).

[11] A., Prusak, O., Melnychuk, H., Roth, I., Schiller and R., Koch, "Pose estimation and map building with a Time-Of-Flight-camera for robot navigation", International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 5(3–4), 355–364. https://doi.org/10.1504/IJISTA.2008.021298, (2008).

[12] S., May, D., Dröschel, D., Holz, F., Iais, S., Fuchs and A., Nüchter, "Robust 3D-Mapping with Time-of-Flight Cameras", (2009).

[13] S., Agnes, B., Liu, J., Penne, O., Jesorsky and R., Kompe, "A Comprehensive System for 3D Modeling from Range Images Acquired from a 3D ToF Sensor", 5th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 2. https://www.researchgate.net/publication/37683456_A_Comprehensive_System_for_3D_Modeling_from_Range _Images_Acquired_from_a_3D_ToF_Sensor, (2007).

[14] J., Feulner, J., Penne, E., Kollorz and J., Hornegger, "Robust Real-Time 3D Modeling of Static Scenes Using Solely a Time-of-Flight Sensor", In 6th IEEE Workshop on Object Tracking and Classification Beyond and in the Visible Spectrum, (2009).

[15] D., Costantino, G., Vozza, M., Pepe and V. S. , Alfio, "Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges", Applied System Innovation 2022, Vol. 5, Page 63, 5(4), 63. https://doi.org/10.3390/ASI5040063, (2022).

[16] N., Bursztyn, B., Shelton, A., Walker and J., Pederson, "Increasing undergraduate interest to learn geoscience with GPS-based augmented reality field trips on students' own smartphones", GSA Today, 27(6), 4–10. https://doi.org/10.1130/GSATG304A.1, (2017).

[17] D. G., De Paor, "Virtual Rocks", GSA Today, 26(8), 4–11. https://doi.org/10.1130/GSATG257A.1, (2016).

[18] A. F., Glazner and J., Douglas Walker, "StraboTools: A mobile app for quantifying fabric in geology", GSA Today, 30(8), 1–8. https://doi.org/10.1130/GSATG454A.1, (2020).

[19] T. L., Pavlis, R., Langford, J., Hurtado and L., Serpa, "Computer-based data acquisition and visualization systems in field geology: Results from 12 years of experimentation and future potential", Geosphere, 6(3), 275–294.

https://doi.org/10.1130/GES00503.1, (2010).

[20] J. D., Walker, B., Tikoff, J., Newman, R., Clark, J., Ash, J., Good, E. G., Bunse, A., Möller, M., Kahn, R. T., Williams, Z., Michels, J. E., Andrew and C., Rufledt, "StraboSpot data system for structural geology," Geosphere, 15(2), 533–547. https://doi.org/10.1130/GES02039.1, (2019).

[21] S. J., Whitmeyer, E. J., Pyle, T. L., Pavlis, W., Swanger and L., Roberts, Modern approaches to field data collection and mapping: Digital methods, crowdsourcing, and the future of statistical analyses", Journal of Structural Geology, 125, 29–40. https://doi.org/10.1016/J.JSG.2018.06.023, (2019).

[22] R. W., Allmendinger, C. R., Siron and C. P., Scott, "Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices", Journal of Structural Geology, 102, 98–112. https://doi.org/10.1016/J.JSG.2017.07.011, (2017).

[23] L., Novakova and T. L., Pavlis, "Modern methods in structural geology of twenty-first century: Digital mapping and digital devices for the field geology", Springer Geology, 43–54. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2781-0_3/COVER, (2019).

[24] F., Zangenehnejad and Y., Gao, "GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives", Satellite Navigation, 2(1), 1–23. https://doi.org/10.1186/S43020-021-00054-Y/TABLES/5, (2021).

[25] M., Amooshahi, A., Milan and Y., jamour, "Feasibility of using smartphones in the reconstruction of the interior architecture of the building without using interior control points", JGST, 12(2):9, http://jgst.issgeac.ir/article-1-1104-fa.html, (2023). (In Persian)

[26] M. I., Razali, A. N., Idris, M. H., Razali and W. M., Syafuan, "Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor", International Journal of Geoinformatics, 18(4), 51-59. https://doi.org/10.52939/ijg.v18i4.2259, (2022).

[27] P. P. C., Chase, K. H., Clarke, A. J., Hawkes, S., Jabari and J. S., Jakus, "Apple IPhone 13 Pro LiDAR Accuracy Assessment for Engineering Applications", Transforming Construction with Reality Capture Technologies. https://doi.org/10.57922/TCRC.645CloudCompare User manual (2.6.1). (n.d.), (2022).

[28] A., Spreafico, F., Chiabrando, L., Teppati Losè and F., Giulio Tonolo, "The Ipad Pro Built-in LIDAR Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B1-2021(B1-2021), 63–69. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B1-2021-63-2021, (2021).

[29] J., Zaczek, "Evaluation of the LiDAR in the Apple iPhone 13 Pro for use in Inventory Works", FIG Congress, (2022).

[30] G., Luetzenburg, A., Kroon and A. A., Bjørk, "Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences", Scientific Reports 2021 11:1, 11(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9, (2021).

[31] M., Torkan, M., Janiszewski, L., Uotinen and M., Rinne, "Method to obtain 3D point clouds of tunnels using smartphone LiDAR and comparison to photogrammetry", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1124(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012016, (2023).

[32] B. E., Heinrichs and M., Yang, "Bias and Repeatability of Measurements from 3D Scans Made Using iOS-Based

Lidar", SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 3(5), 2219–2226. https://doi.org/10.4271/2021-01-0891, (2021).

[33] A. Sh., Amini, M., Varshusaz, M. S., Sarasht, "Investigating the influence of parameters of the basic relationship of network design on the final accuracy of short-range photogrammetry", Geomatic Conference and the 4th Conference on Unification of Geographical Names, https://civilica.com/doc/37106, (2008).

[34] G., Vacca, "3D Survey with Apple LiDAR Sensor—Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage", Heritage 2023, Vol. 6, Pp. 1476-1501, 6(2), 1476–1501. https://doi.org/10.3390/ HERITAGE6020080, (2023).

[35] S., Rusinkiewicz and M., Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm", Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 3DIM, 145–152. https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423, (2001).

[36] T. O., Hodson, "Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not", Geosci. Model Dev, 15, 5481–5487. https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022, (2022).